

考虑残余应力影响的焊接工字型弧门支臂稳定数值分析的等效模型研究

张学东¹, 韩一峰², 王正中¹, 李会军¹, 徐超¹, 张欢龙¹, 刘丰¹

(1. 西北农林科技大学旱区寒区水工程安全研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 弧形钢闸门的失事破坏主要是由于支臂发生屈曲失稳导致的, 支臂的稳定性是保证整个闸门安全稳定运行的前提。针对当前支臂稳定计算精度和求解效率不足的问题, 为探究可用于支臂实际稳定承载力计算的等效简化模型, 确定出考虑残余应力对稳定性影响的综合初始缺陷幅值, 以两端铰接的焊接工字型弧门支臂为研究对象, 采用非线性屈曲分析方法探究残余应力分布模式、残余压应力峰值以及几何初始缺陷幅值等因素对其稳定承载力的交互影响, 并与现行《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)计算结果进行对比验证。结果表明: 对于大柔度支臂, 综合初始缺陷幅值取为 $L/600$; 而对于中小柔度支臂, 综合初始缺陷幅值取为 $L/400$ 。按照综合初始缺陷幅值所建立的支臂等效模型能够充分考虑截面残余应力及几何初始缺陷对稳定承载力的综合影响, 数值计算结果与《标准》计算结果吻合较好, 可以替代原有支臂复杂的非线性稳定模型。研究成果可为工程技术应用提供参考。

关键词: 弧形钢闸门; 工字型弧门支臂; 稳定分析; 残余应力; 等效模型

中图分类号: TV314

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0172-08

Equivalent model for numerical stability analysis of welded I-shaped radial gate arm considering the influence of residual stress

ZHANG Xuedong¹, HAN Yifeng², WANG Zhengzhong¹, LI Huijun¹,
XU Chao¹, ZHANG Huanlong¹, LIU Feng¹

(1. Water Engineering Safety Research Center for Arid & Cold Regions, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The failure of the radial steel gate is mainly caused by the buckling instability of its supporting arm, and the stability of the arm is the premise of safe and stable operation of the whole gate. Aiming at the current problem of insufficient calculation accuracy and efficiency of the arm stability, it is of great significance to find an equivalent simplified model which can be used to calculate the actual stability bearing capacity of the arm, and determine the comprehensive initial imperfection amplitude considering the influence of residual stress on the stability. Taking the welded I-shaped arm with two hinged ends as the research object, we investigated the interactions between the stability bearing capacity and the factors of residual stress distribution mode, residual compressive stress peak value and geometric initial imperfection amplitude using a nonlinear buckling analysis method. Then the calculation results were compared with the specified value in the *Standard for Design of Steel Structures* (GB 50017—2017). The results show that for large flexible arm, the comprehensive initial imperfection amplitude is $L/600$, whereas for medium and small flexible arms, it is $L/400$. The proposed equivalent model fully considers the influence of cross-section residual stress and geometric initial imperfection on the stability bearing capacity of the arm. Its calculation results are in good agreement with the specified val-

收稿日期: 2021-05-14; 修回日期: 2021-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179164); 国家自然科学基金青年基金项目(51505388); 国家科技支撑计划项目(2012BAD10B02)

作者简介: 张学东(1994-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为水工结构有限元分析标准化。

通讯作者: 王正中(1963-), 男, 陕西彬县人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为水工程安全及其灾害防治理论与技术。

ue in the standard, so it can replace the original complex nonlinear stability model for gate arms. The research results can provide some reference for the application of the model in actual projects.

Key words: radial steel gate; I-shaped radial gate arm; stability analysis; residual stress; equivalent model

1 研究背景

支臂作为弧形钢闸门的主要承重结构,承受着来自面板上游较大的水压力。对国内外弧形钢闸门的事事故调查分析发现,闸门失事破坏主要是由于支臂发生屈曲失稳造成的,保证支臂的稳定性是决定整个闸门安全稳定运行的关键^[1],因此对弧门支臂进行精确化稳定承载力分析十分必要。

在结构受力特性上,支臂属于以承受轴力作用为主的钢柱构件,虽然运用结构稳定理论能够计算出受压构件的屈曲荷载,然而支臂在实际生产过程中,由于制造安装偏差和板件焊接工艺自身不可避免地产生初弯曲和残余应力,外加上材料、几何非线性性的影响,稳定方程的求解就变得异常困难^[2]。另外,现行《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[3](以下简称《标准》)虽然能够用于求解受压构件的屈曲问题,但是难以适用于两端复杂约束以及由单杆组成的复杂结构体系的稳定问题,通用性较差。为得到稳定承载力的准确计算结果,非线性屈曲分析方法已成为结构稳定计算的主要方式,施刚等^[4]、班慧勇等^[5-6]和李国强等^[7-8]采用非线性有限元法对轴压柱的稳定承载力进行了数值计算,通过试验实测数据验证了采用非线性有限元数值模型进行受压构件稳定承载力计算的可行性和有效性。施钢等^[9]和姜学宜等^[10]详细地介绍了建立钢柱有限元模型和整体稳定特性求解的全过程,提出了输入构件几何初始缺陷和模拟截面残余应力的方法。Xie等^[11]、Dorfmann等^[12]和李元齐等^[13]通过建立考虑几何初始缺陷和残余应力的有限元模型,发现了残余应力对轴心受压构件的稳定性有着显著影响。然而,在对闸门支臂进行屈曲分析时,通常仅按照《标准》施加一定的几何初始缺陷而不考虑截面残余应力对稳定性的影响,使得计算结果并不可靠^[14-15]。因此,建立能够充分模拟弧门支臂各种初始缺陷的精细化有限元模型对稳定计算至关重要,但是截面残余应力的试验测量操作复杂,并且数值模型中施加残余应力会增大建立精确数值模型的难度,增加模型复杂性,导致计算求解十分耗时。为提高结构分析计算效率,《标准》表明对于考虑材料弹性发展的直接分析设计法,可以将残余应力对稳

定性的不利影响综合到几何初始缺陷中一并考虑^[3,16]。然而,《标准》并未对综合初始缺陷幅值作出相应规定,使得例如支臂这类受压构件稳定数值分析的简化模型在施加初始缺陷时缺少依据。因此,确定出能高效准确描述初始缺陷、几何和材料非线性影响的支臂稳定分析等效模型显得尤为重要。

基于此,本文对考虑残余应力影响的焊接工字型弧门支臂有限元等效模型展开相关研究。首先,对不同长细比支臂建立考虑几何初始缺陷和残余应力的有限元模型,再进行非线性屈曲分析,并将稳定承载力计算结果与《标准》结果对比,验证有限元模型的正确性;其次,将残余应力对整体稳定性的影响综合到几何初始缺陷中考虑,以与《标准》稳定计算结果等效为原则,确立了焊接工字型弧门支臂有限元等效模型的综合初始缺陷幅值;最后,对等效模型在不同长细比条件下的适用性作出相应评价,以期能为工程结构的有效分析提供借鉴与参考。

2 结构稳定理论

2.1 轴压稳定理论

早在18世纪,欧拉就对轴心压杆的整体稳定问题进行了研究,假定压杆为“理想轴心压杆”,并且材料是完全均匀和线弹性的,通过平衡方程推导出了著名的欧拉公式^[17]:

$$N_E = \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2} \quad (1)$$

式中: N_E 为欧拉临界荷载,N; E 为材料的弹性模量,Pa; A 为轴心压杆的截面面积, m^2 ; λ 为轴心压杆的最大长细比。

从欧拉公式可以看出,欧拉临界荷载只与压杆的长细比有关,与截面类型、材料属性均无关。由于欧拉公式是在假定的前提下推导出来的,即压杆失稳时的屈曲应力仍处于弹性阶段内,所以欧拉公式的适用范围可表示为:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leq \sigma_p \quad (2)$$

或:

$$\lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_p}} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_p}} = \lambda_p \quad (3)$$

式中: σ_{cr} 为临界应力,Pa; σ_p 为材料比例极限,Pa; λ_p 为轴心压杆柔度界限值。当 $\lambda \geq \lambda_p$ 时,压杆为大

柔度压杆,或细长压杆;当 $\lambda < \lambda_p$ 时,压杆为中小柔度压杆。

2.2 压溃理论

欧拉公式、切线模量理论与双模量理论均是基于理想轴心压杆的前提下研究推导出来的,然而受几何初始缺陷、残余应力的影响,轴心压杆的整体稳定性问题属于极值点失稳问题^[18-19],那么计算结果并不符合实际。为了与实际情况相一致,Von Karman提出了考虑压杆初始缺陷的压溃理论,按照偏心压杆稳定公式计算,从而逐渐形成了由极限荷载确定出轴心受压构件不同长细比稳定系数的极限承载力理论。由于极限承载力理论综合考虑了各种初始缺陷的影响,符合压杆的实际情况,因此被各个国家普遍采用和推广,我国的现行《标准》也是采用这一理论对轴心受压构件进行整体稳定计算并给出了多条柱子曲线,用于指导结构的稳定设计。

《标准》中对实腹式轴心受压构件的稳定性按照以下公式计算:

$$\frac{N}{\varphi A} \leq f \quad (4)$$

式中: N 为轴向压力,N; φ 为稳定系数; A 为截面面积, m^2 ; f 为钢材的抗拉强度设计值,Pa。其中,稳定系数 φ 的计算取截面两主轴稳定系数的较小值,即根据截面分类、钢材的屈服强度与两主轴方向长细比的较大者查附表所得。

3 有限元模型及验证

3.1 试件概况

为研究支臂稳定数值分析的等效模型,将支臂简化为轴心受压构件。选取的研究对象为两端铰接的Q235焊接工字型支臂,其中截面翼缘和腹板的宽厚比均满足局部稳定性要求,选取的支臂几何长度范围为6~24 m,共计10种不同长度类型。计算求得长细比 λ 的取值范围为52~207,由上述公式(3)可得长细比临界值 λ_p 为93.01,那么选取的试件涵盖了从中等柔度到大柔度变化的支臂构件,失稳模式也同样包含了弹性失稳和弹塑性失稳两种模式,从而能够较为全面地研究不同失稳类型的支臂稳定问题。各支臂试件稳定数值分析模型的主要参数如表1所示,其中截面翼缘宽度为500 mm,厚度为34 mm;腹板高度为620 mm,厚度为30 mm。

3.2 有限元模型

采用通用的有限元软件ANSYS建立三维有限元模型,由于选取的受压构件其截面宽厚比均满足

局部稳定的要求,分析模型主要针对支臂的整体稳定进行研究,不考虑板件局部屈曲的影响,即采用三维有限应变梁单元BEAM188进行模拟,能够很好地分析长细比大到中等的各类梁柱构件^[20]。首先,根据支臂截面尺寸定义工字型为梁单元的截面类型,建立长度不同的参数化有限元模型,所有构件沿长度方向均划分为20个单元。

表1 各支臂试件稳定数值分析模型主要参数

试件	长度/ m	截面面积/ $10^{-2}m^2$	惯性矩/ $10^{-4}m^4$	回转半径/ m	长细比
1	6	5.26	7.097	0.116	52
2	8	5.26	7.097	0.116	69
3	10	5.26	7.097	0.116	86
4	12	5.26	7.097	0.116	103
5	14	5.26	7.097	0.116	121
6	16	5.26	7.097	0.116	138
7	18	5.26	7.097	0.116	155
8	20	5.26	7.097	0.116	172
9	22	5.26	7.097	0.116	189
10	24	5.26	7.097	0.116	207

模型两端为铰接约束条件,即约束底端节点的 UX 、 UY 和 UZ 平动自由度,约束顶端节点受压面内的平动自由度 UX 和 UZ ,除此之外,为使得支臂发生绕截面弱轴方向的整体弯曲失稳变形,其两端不能发生扭转变形,即约束两端节点绕轴向转动的自由度 $ROTY$ 。工字型支臂典型试件的有限元模型如图1所示。

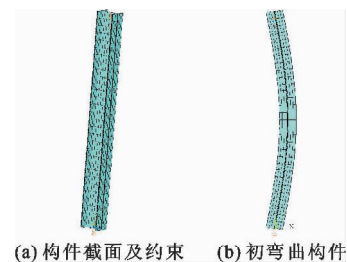


图1 工字型支臂典型试件的有限元模型

3.2.1 材料属性 当长细比较小,即 $\lambda < 93.01$ 时,支臂发生屈曲失稳时不再是弹性状态,而是产生了材料弹塑性变形,则有限元分析中钢材的本构模型采用Von Mises屈服准则下的理想弹塑性等向强化模型,并设置非线性材料属性中切线模量为零,屈服应力设置为材料的屈服强度 $f_y = 235$ MPa,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^{11}$ Pa,泊松比取为0.3。

3.2.2 几何初始缺陷 支臂有限元模型同时考虑了几何初始缺陷与截面残余应力分布的影响,其中,

几何初始缺陷的幅值根据我国《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205—2020)^[21]取为 1‰柱长。几何初始缺陷目前主要有两种施加方法:第一种是基于第一阶特征值屈曲模态(整体弯曲屈曲)施加,利用 ANSYS 命令 UPGEOM 更新模型节点坐标来实现;第二种是根据构件的几何初弯曲和荷载初偏心直接建立带有几何初始缺陷的有限元模型,按照正弦半波曲线模式分布。为提高有限元计算效率,本文采取第二种方法施加,在定义节点坐标时将对应位置的几何缺陷考虑其中,支臂沿长度方向的几何初始缺陷 e 为:

$$e = e_0 \cdot \sin(\pi x/L) \quad (5)$$

式中: $e_0 = L/1000$; L 为支臂长度, m。

3.2.3 截面残余应力 截面残余应力可参考欧洲钢结构协会推荐的截面残余应力分布模式^[22],对于常见的焊接 I 型或工字型截面,残余应力分布有 Lehigh 模型和抛物线模型两种,如图 2 所示。其中,Lehigh 模型的残余应力沿截面线性变化,翼缘边两端的残余压应力峰值为 $\sigma_{rc} = 0.3 f_y$,腹板上均匀分布的残余拉应力 σ_{rt} 由构件截面上残余应力平衡条件求得;而抛物线模型的残余应力分布比较复杂,为了便于计算,可保证残余拉、压应力幅值不变,将抛物线残余应力分布模型简化为线性分布,其中残余压应力峰值 σ_{rc} 与残余拉应力峰值 σ_{rt} 皆为 $0.3 f_y$ 。

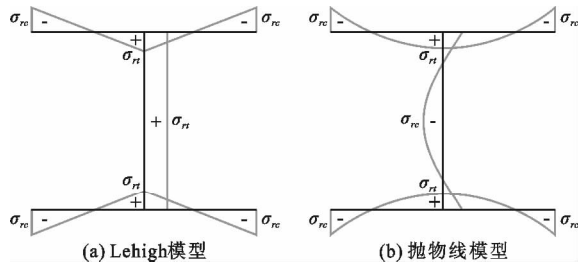


图 2 焊接工字型截面残余应力两种分布模型

残余应力的施加通过编写初应力文件输入到 ANSYS 中来实现^[23],即先提取截面积分点的序号和位置坐标,保存为 intcord.txt 文件,然后读取该文件中积分点的位置坐标生成 yint、zint 两个数组;根据翼缘两端已知的残余压应力峰值,计算截面其他位置积分点的残余应力值,并输入生成残余应力的 srint 数组;最后将残余应力值作为初始应力输入至截面对应的积分点上,并且由于各板件的厚度较小,不考虑残余应力沿板厚的变化。以残余压应力峰值 $0.3 f_y$ 为例,施加残余应力的两种模型横截面如图 3 所示。

在有限元模型端部施加轴向荷载,并考虑材料、几何双重非线性影响,采用弧长法计算整体稳定承

载力 F_u 。

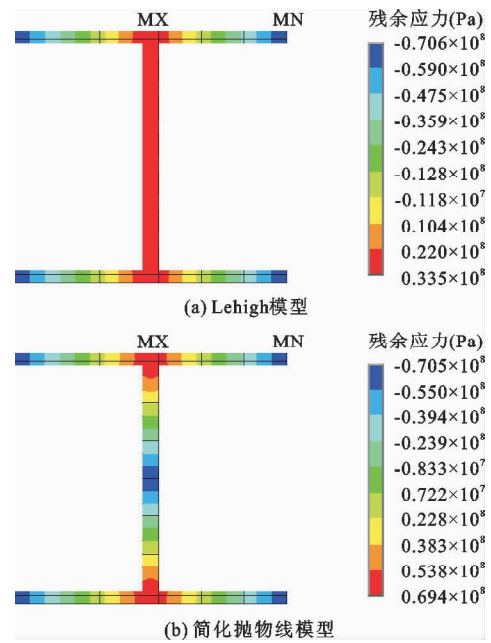


图 3 施加残余应力的两种模型工字型横截面应力分布(残余压应力峰值为 $0.3 f_y$)

3.3 精细化有限元模型验证

根据《标准》考虑 $L/1000$ 的几何初始缺陷,按照 Lehigh 模型和简化抛物线模型分别施加截面残余应力对上述支臂构件进行考虑材料、几何双重非线性的屈曲分析。为了验证上述有限元模型所模拟的残余应力分布的正确性,现选取的残余压应力峰值以 $0.1 f_y$ 为增量,从 $0.1 f_y$ 递增到 $1.0 f_y$,共计 10 种残余应力类型,共 100 组。

以试件 1 为例,不同残余压应力峰值条件下两种模型典型的荷载-位移曲线如图 4 所示;以残余压应力峰值 $0.3 f_y$ 为例,不同长度条件下两种模型典型的荷载-位移曲线如图 5 所示;以《标准》中轴向受压构件的稳定计算公式即公式(4)的计算结果为基准,不同长度和残余压应力峰值条件下两种模型计算的支臂稳定承载力相对误差如图 6 所示。

由图 4~6 可以看出,当截面残余应力采用 Lehigh 模型和简化抛物线模型时,支臂稳定承载力均随着残余压应力峰值的增大而呈现逐渐减小的变化趋势,与《标准》对比的相对误差也呈现先减后增的变化趋势,大致呈抛物线分布。相对误差面的最小值即为考虑不同残余压应力峰值条件下稳定承载力计算误差最小时的残余压应力峰值分布区域。从坐标面投影可以看出,对于 Lehigh 模型和简化抛物线模型两种残余应力分布模式,残余压应力峰值为 $0.3 f_y$ 时,其与《标准》对比的计算误差均为最小。

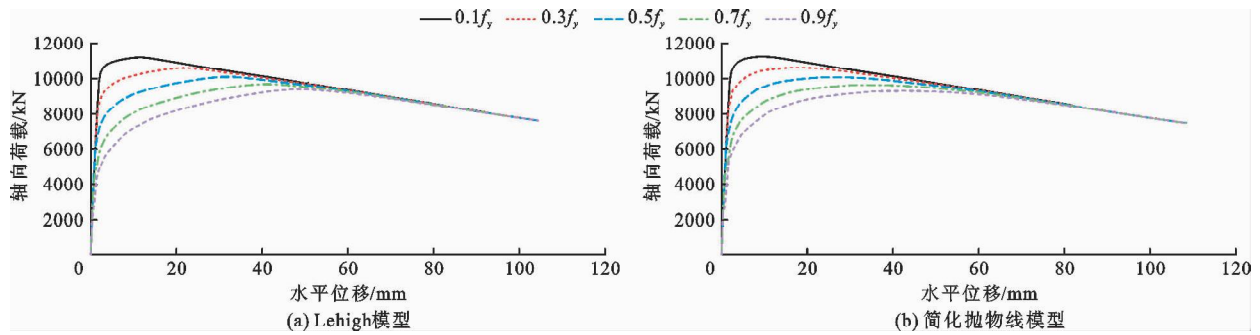


图4 不同残余压应力峰值条件下两种模型典型的荷载-位移曲线

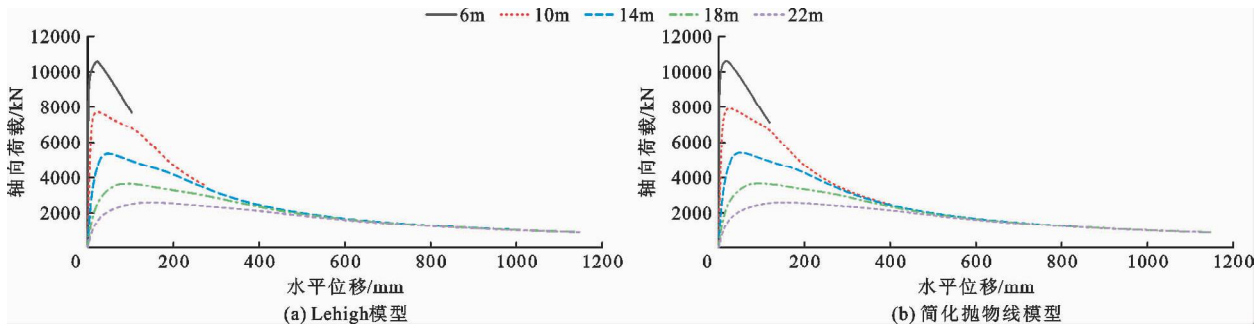


图5 不同长度条件下两种模型典型的荷载-位移曲线

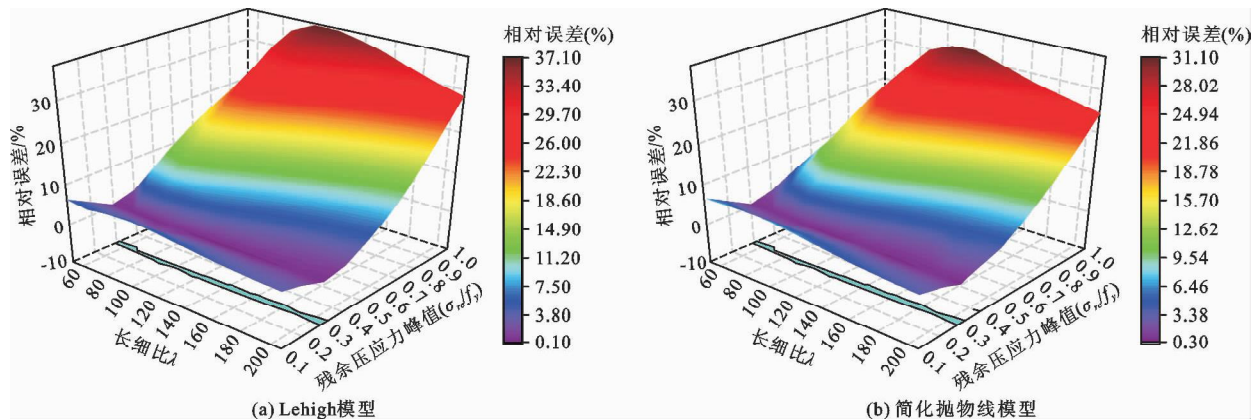


图6 不同长度和残余压应力峰值条件下两种模型计算的支臂稳定承载力相对误差

图7为当截面残余压应力峰值取 $0.3f_s$ 时,有限元计算的整体稳定承载力 $F_{u,e}$ 与《标准》计算稳定承载力 $F_{u,1}$ 的对比结果。由图7可以看出,采用两种残余应力分布模式建立的有限元分析模型得到的稳定承载力与《标准》计算结果均吻合良好,计算误差的均值和标准差均较小。其中,Lehigh模型的误差均值为 -1.10% ,标准差为 -0.0210 ;简化抛物

线模型的误差均值为 -0.13% ,标准差为 0.0103 。因此,本文按照 $L/1000$ 的几何初始缺陷、残余压应力峰值为 $0.3f_s$ 所建立的非线性有限元模型能够准确模拟出支臂实际稳定承载力以及失稳变形特征,与欧洲钢结构设计规范一致,验证了有限元模型的正确性,同时也为我国现行《标准》中残余应力峰值的取值提供了参考。

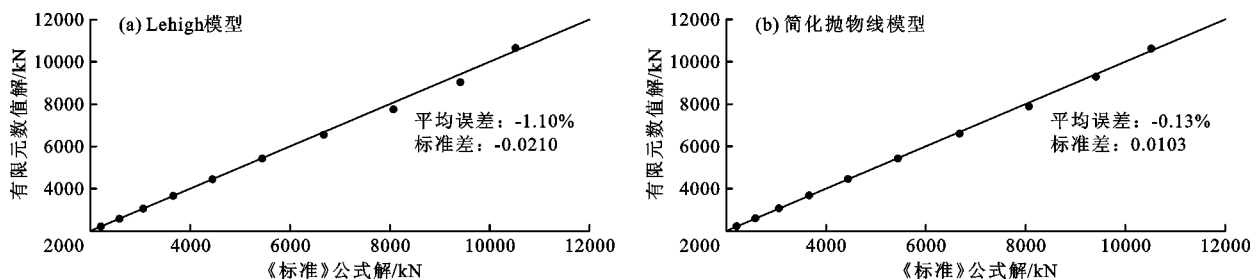


图7 支臂稳定承载力有限元计算与《标准》计算结果对比

4 考虑残余应力影响的等效模型

4.1 残余应力对支臂承载力的影响性

上述支臂有限元模型不仅考虑了 $L/1000$ 的几何初始缺陷,同时又考虑了截面残余应力的影响,可采用模型 II 为非线性屈曲分析的有限元模型,以此来计算构件的稳定承载力。为进一步研究 Q235 焊接工字型支臂的残余应力对整体稳定性的影响,利用有限元模型计算上述 10 种不同长度支臂的稳定承载力,计算过程中仅改变所施加的初始缺陷类型,其余条件均不变。仅考虑几何初始缺陷的稳定承载力计算结果与综合考虑了截面残余应力影响的稳定承载力计算结果的比较如图 8 所示。

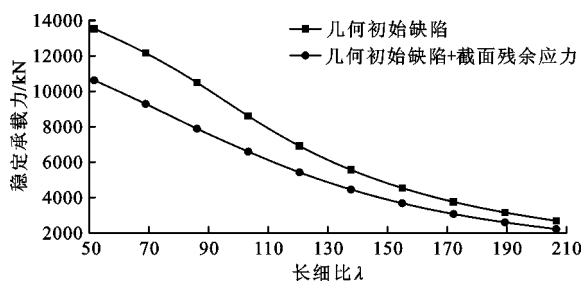


图8 两种不同条件下支臂的稳定承载力计算结果

由图8可以看出,对于不同长细比的支臂,相较于仅施加几何初始缺陷的有限元模型,考虑截面残余应力的模型会减小其稳定承载力,并且减小的程度随着长细比的增大逐渐趋于缓和。原因是由于截面翼缘两端和腹板跨中存在较大的残余压应力,在轴向压力的作用下该位置容易发生材料屈服,并且由于应力重分布使得截面上的屈服范围进一步扩展,支臂就会提前发生整体失稳,那么其稳定承载力就会降低。并且随着长细比的增大,失稳类型逐渐由局部弹塑性失稳转化为弹性整体失稳,此时几何初始缺陷对稳定性的影响占据主导作用,而残余应力影响较小。对施加两种不同初始缺陷类型的模型计算结果进行比较,发现截面残余应力的存在使得支臂稳定承载力减小了20%左右,其中试件1最大,为25%,试件10最小,为17%,说明截面残余应力对支臂的整体稳定性影响较大,在稳定承载力计算时不容忽视。

4.2 简化残余应力的有限元等效模型

为提高计算分析效率,对焊接工字型弧门支臂的非线性稳定模型作适当简化,将残余应力对整体稳定性的影响综合到几何初始缺陷中考虑。由于现行《标准》规定受压构件的几何初始缺陷为 $1/1000$

柱长,因而综合考虑残余应力影响的支臂等效简化模型所应施加的初始缺陷 $e_0 > L/1000$ 。现以 $L/1000 \sim L/100$ 为综合初始缺陷的变化范围,对上述10种不同长细比的支臂进行非线性屈曲分析,共计190组试件模型。计算得到不同综合初始缺陷幅值条件下的稳定承载力如图9所示。

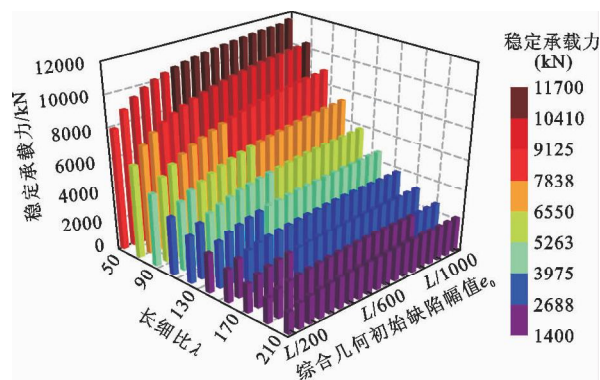


图9 不同综合初始缺陷幅值下支臂的稳定承载力计算结果

由图9可以看出,随着长细比的增加,不同缺陷幅值下的有限元计算结果均减小,且减小的趋势逐渐放缓;初始缺陷对稳定承载力的影响较大,初始缺陷幅值越大,支臂越容易发生整体失稳,其稳定承载力就越低;随着长细比的增大,不同初始缺陷幅值条件下的计算结果越来越接近,表明初始缺陷对支臂整体稳定性的影响逐渐减小。

对上述支臂的稳定承载力数据进行误差分析,以《标准》公式计算结果为基准计算两者的相对误差,并计算相对误差最小时的综合初始缺陷幅值条带分布,其结果见图10。由图10(a)可以看出,随着支臂模型综合初始缺陷幅值的增大,有限元计算结果与标准解的相对误差先减小而后又逐渐增大。经分析,误差面与零基准面的相交处即为考虑不同初始缺陷幅值条件下稳定承载力计算误差最小时的初始缺陷分布区域。由图10(b)可以看出,当长细比 $\lambda > 100$ 时,相对误差最小时的综合初始缺陷幅值大致分布在 $L/600$ 的位置;而当长细比 $\lambda < 100$ 时,合理的综合初始缺陷幅值分布在 $L/400 \sim L/600$ 的范围之内。

5 等效模型适用性评价

为探究焊接工字型弧门支臂等效模型在不同条件下的适用性与优越性,分别采用标准公式法、特征值法以及非线性等效模型法对上述10种不同长细比支臂的稳定承载力进行计算,其中,对于大柔度支臂构件,施加 $L/600$ 的综合初始缺陷,而对于中小柔

度支臂构件,施加 $L/400$ 的综合初始缺陷。可得其稳定承载力随长细比的变化曲线,如图 11 所示。

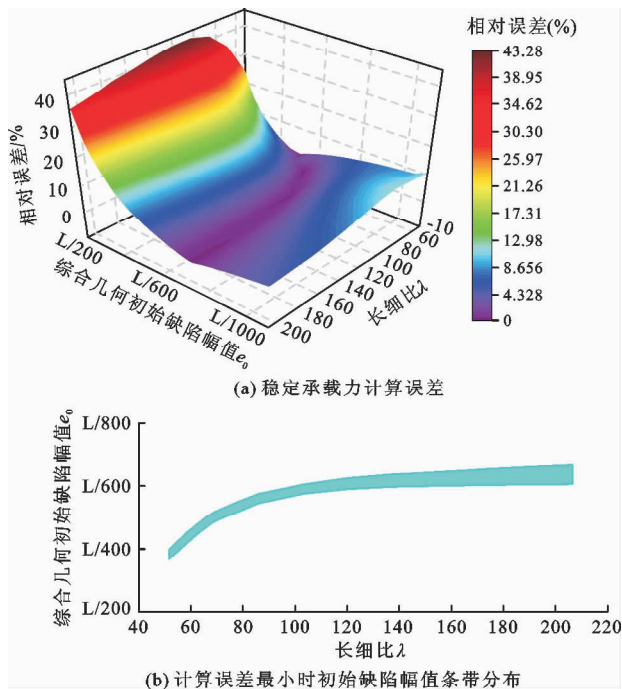


图 10 不同初始缺陷幅值下支臂的稳定承载力计算精度比较

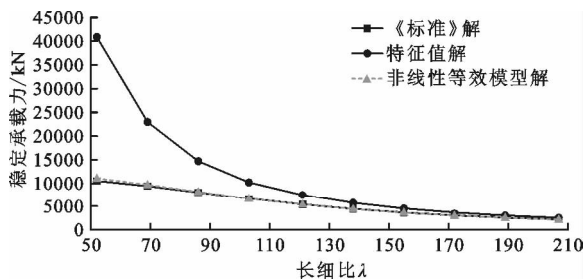


图 11 不同计算方法的支臂稳定承载力随长细比变化曲线

由图 11 可以看出,按照以上 3 种方法计算得到的稳定承载力均随长细比的增大而逐渐减小,其中特征值屈曲分析计算结果均比《标准》和非线性屈曲分析计算结果大,而后两者的变化曲线几乎重合,非线性等效模型的有限元数值解与《标准》解吻合较好。当长细比较小时,特别是对于中小柔度支臂构件来说,特征值屈曲计算结果与《标准》计算结果相比误差较大,最大值为 288.45%。并且随着长细比的增大,支臂构件从中小柔度变化到大柔度时,特征值屈曲分析计算结果逐渐接近于《标准》计算结果,误差逐渐减小,而非线性等效模型的有限元计算结果与《标准》计算结果相比误差很小,最大值仅为 2.70%。这表明非线性等效模型法的计算结果与《标准》计算结果始终保持一致,而特征值法的计算结果远大于《标准》计算结果,原因是因为非线性等

效模型和现行《标准》公式均考虑了初始缺陷等不利因素对稳定承载力的影响,而特征值屈曲分析假定支臂构件为理想轴心受压状态,偏离了实际情况。

通过上述分析表明,特征值法仅适用于粗略计算大柔度支臂构件的稳定承载力,而且计算结果偏危险,而非线性等效模型法能够准确计算出任意柔度支臂构件的稳定承载力。施加以上综合初始缺陷幅值的非线性简化模型既可以考虑《标准》中 $L/1000$ 的几何初始缺陷,又综合了截面残余应力的影响,其计算结果与《标准》等效。相较于传统的焊接工字型支臂构件稳定计算方法,求解效率高且适用性好,能够很好地解决弧门支臂的屈曲问题。

6 结 论

本文通过采用非线性屈曲分析法对焊接工字型弧门支臂进行稳定计算,探究了考虑截面残余应力影响的非线性等效模型综合初始缺陷幅值的问题,并对等效模型在解决屈曲问题的适用性方面作出了相应评价。主要结论如下:

(1) 对于工字型截面残余应力为 Lehigh 模型和简化抛物线模型两种分布模式,均是当残余压应力峰值为 $0.3 f_y$ 时稳定承载力的计算精度最高,并且两种残余应力分布模式对稳定性计算的影响相差不大,可为支臂非线性精细化有限元模型中截面残余应力的施加提供相应依据。

(2) 施加 $L/1000$ 几何初始缺陷幅值和 $0.3 f_y$ 截面残余压应力峰值所建立的支臂有限元模型能够准确模拟几何初始缺陷和截面残余应力对构件整体稳定特性的影响,通过将有限元数值结果与《标准》稳定计算结果对比,验证了支臂精细化有限元模型的正确性。

(3) 几何初始缺陷对支臂稳定承载力的影响较大,对于大柔度支臂构件,建议综合初始缺陷幅值取为 $L/600$;而对于中小柔度支臂构件,建议综合初始缺陷幅值取为 $L/400$,以保证计算结果偏于安全。与《标准》中几何初始缺陷 $L/1000$ 相比,按照本文确定的综合初始缺陷幅值所建立的支臂等效模型综合考虑了残余应力对稳定性的影响,能够准确高效地计算出构件的稳定承载力。

(4) 特征值法仅能够粗略求解大柔度支臂构件的屈曲问题,而非线性等效模型法能够很好地解决实际工程中各种柔度支臂构件的屈曲问题。在焊接工字型弧门支臂稳定问题求解时,可以统一建立非线性等效简化模型,为支臂结构分析和参数化设计提供高效的计算方式。

参考文献:

- [1] 王正中,张雪才,刘计良.大型水工钢闸门的研究进展及发展趋势[J].水力发电学报,2017,36(10):1-18.
- [2] 陈骥.钢结构稳定理论与设计(第六版)[M].北京:科学出版社,2014.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [4] 施刚,林错错,周文静,等.460MPa 高强钢箱形截面轴压柱局部稳定有限元分析和设计方法研究[J].工程力学,2014,31(5):128-136.
- [5] 班慧勇,施刚,石永久.高强钢焊接箱形轴压构件整体稳定设计方法研究[J].建筑结构学报,2014,35(5):57-64.
- [6] 班慧勇,施刚,石永久,等.国产 Q460 高强钢焊接工形柱整体稳定性能研究[J].土木工程学报,2013,46(2):1-9.
- [7] 李国强,王彦博,陈素文,等.Q460 高强钢焊接箱形柱轴心受压极限承载力参数分析[J].建筑结构学报,2011,32(11):149-155.
- [8] 李国强,李天际,王彦博.Q690 钢焊接 H 形截面轴压柱整体稳定性能研究及设计方法[J].土木工程学报,2018,51(2):1-10+31.
- [9] 施刚,石永久,王元清.运用 ANSYS 分析超高强度钢材钢柱整体稳定特性[J].吉林大学学报(工学版),2009,39(1):113-118.
- [10] 姜学宜,徐咏雷,施刚,等.高强钢材焊接工字形截面受压构件有限元分析[J].钢结构,2014,29(3):7-11.
- [11] XIE Xingkun, SHAO Fei, GAO Lei, et al. Research on residual stress of a BS700 butt-welded box section and its influence on the stability of axial compression members [J]. Materials, 2020, 13(15): 3282.
- [12] DORFMANN L, OGDEN R W. The effect of residual stress on the stability of a circular cylindrical tube[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2021, 127(1): 1-19.
- [13] 李元齐,李功文,沈祖炎.残余应力对冷弯厚壁方矩管轴压承载力的影响[J].建筑钢结构进展,2017,19(6):43-50.
- [14] 余星睿,杨光明,刘良.潜孔式弧门不同开度泄流时支臂稳定性分析[J].水力发电,2021,47(1):94-98+116.
- [15] TANKOVA T, DA SILVA L S, BALAKRISHNAM M, et al. Residual stresses in welded I section steel members [J]. Engineering Structures, 2019, 197: 109398.
- [16] 中华人民共和国水利部.水利水电工程钢闸门设计规范:SL 74—2019[S].北京:中国水利水电出版社,2019.
- [17] SOKOL KRZYSZTOF, UZNY SEBASTIAN. Instability and vibration of multi-member columns subjected to Euler's load[J]. Archive of Applied Mechanics, 2016, 86(5): 883-905.
- [18] 冯亮亮,聂诗东,沈乐,等.残余应力对焊接箱形轴压柱整体稳定性能的影响[J].工业建筑,2017,47(10):168-174.
- [19] 王登峰,贾文文,王元清等.初始缺陷对除尘器壳体立柱轴压稳定性的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(8):2810-2819.
- [20] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.钢结构工程施工质量验收标准:GB 50205—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.
- [22] British Standards Institution. Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-1 General rules and rules for buildings; BS EN 1993-1-1: 2005[S]. London: The Standards Policy and Strategy Committee, 2005.
- [23] 王彦博,李国强,陈素文,等.Q460 高强钢焊接 H 形柱轴心受压力学性能数值分析[J].建筑钢结构进展,2013,15(5):1-7.